

MICHAŁ WOŹNY  
Uniwersytet Zielonogórski

## **NEUROOBRAZOWANIE. PRZEGLĄD KRYTYKI FMRI**

### **WSTĘP**

Począwszy od lat osiemdziesiątych XX wieku, psychologowie zaczęli wykorzystywać fMRI do testowania hipotez o procesach poznawczych i ich neuronalnych korelatkach (Farah, 2014). W krótkim czasie metody neuroobrazowania stały się podstawowym narzędziem badania ludzkiego umysłu. Tak szybki ich rozwój oraz zaskakujące wyniki zrodziły jednak sceptycyzm i falę krytyki, która towarzyszyła zjawisku neuroobrazowania niemal od samego początku (Bickle, Hardcastle, 2012). Problemy poruszane przez krytyków neuroobrazowania rozciągają się od kwestii interpretacji wyników (Klein, 2010a), przez zagadnienia związane z założeniami teoretycznymi metody (Koechlin, Summerfield, 2007), aż po możliwości zastosowania wyników neuroobrazowania w naukach szczegółowych (Uttal, 2001) i w filozofii (Bickle, Hardcastle, 2012).

Celem niniejszego artykułu jest przegląd krytyki neuroobrazowania.

### **JAK DZIAŁA FMRI?**

Funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI) jest najpopularniejszym narzędziem wykorzystywanym w neuroobrazowaniu, dlatego ograniczę się do omówienia zasad jego działania.

Technika rezonansu magnetycznego opiera się na zjawisku o tej samej nazwie. Oddziaływanie pomiędzy polami magnetycznymi cząstek organizmu a generowanym sztucznie polem magnetycznym pozwala na wytworzenie obrazu tkanki (Buxton, 2002).

Wielość pól elektromagnetycznych, wytwarzanych przez różnorodne elementy organizmu, pozwala na obrazowanie wielu zjawisk. Jednym z nich jest związana z aktywnością neuronalną zmienność krążenia krwi, którą wykorzystuje funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI). Krew zaopatrująca naczynia krwionośne neuronów w tlen, po ich aktywacji, wysyca się odtlenowaną hemoglobina, wykazującą właściwości paramagnetyczne, wpływające na zmienność pola magnetycznego odbieranego przez MRI. Zmiany te w literaturze nazywane są *blood oxygen level dependent* – BOLD (Savoy, 2001).

Funkcjonalny rezonans magnetyczny śledzi zatem zmiany parametru BOLD w tkankach, które następują po aktywacji neuronów w danym obszarze. Dostarcza to pośredniego obrazu aktywności neuronalnej. Wyniki fMRI nie są jednak prostym przedstawieniem parametru BOLD, który sam w sobie jest trudny do zinterpretowania, często znika w szumie innych sygnałów oraz przechodzi gwałtowne zmiany w krótkim czasie (Klein, 2010a). Wyniki fMRI są mapami statystycznymi obszarów, w których zaistniała istotna statystycznie różnica w parametrze BOLD podczas wykonywania zadania testowego (Klein, 2010a).

W celu wytworzenia takiej mapy parametr BOLD w każdym pikselu obrazu (może być ich nawet do pięćdziesięciu tysięcy) jest poddawany testowi istotności statystycznej dla hipotezy zerowej w warunkach testowych i pozatestowych. Proces ten przebiega w dwóch krokach. Pierwszy z nich polega na obliczeniu prawdopodobieństwa zaobserwowania danego stanu danych przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa. Hipoteza zerowa zakłada natomiast, że zadanie testowe nie miało żadnego wpływu na otrzymane wyniki, a więc, że nie zaszła żadna zmiana aktywacji neuronalnej w danym obszarze podczas wykonywania zadania testowego. Wartość powyższego testu, reprezentującego wystąpienie zmian w zależności od hipotezy zerowej, nazywana jest wartością  $p$ . Drugi krok zakłada natomiast porównanie wartości  $p$  otrzymanej w kroku pierwszym z ustaloną wcześniej wartością, dla której wyniki uznaje się za statystycznie istotne. Zwyczajowo przyjmuje się, że dane istotne statystycznie to te, dla których  $p < 0,05$ . Wyniki statystycznie istotne to takie wyniki, których zaobserwowanie byłoby nieprawdopodobne, gdyby zadanie wykonywane przez badanego na nie nie wpływało. Nieprawdopodobne oznacza w tym przypadku, że moglibyśmy je losowo zaobserwować pięć razy podczas stu obserwacji. Gdybyśmy ustalili próg istotności statystycznej  $p = 0,001$ , wówczas prawdopodobnie zaobserwowalibyśmy je losowo raz na tysiąc obserwacji. Wyniki dla poszczególnych pikseli nanoszone są na anatomiczną mapę mózgu i oznaczane kolorami (Klein, 2010a).

Mapy statystyczne wytworzone podczas przedstawionej powyżej analizy pokazują piksele, dla których wartość  $p$  była równa lub niższa od przyjętego progu istotności. Kolory używane podczas tworzenia takiej mapy zwykle odzwierciedlają nasilenie wartości parametru  $p$  danego piksela: im niższa wartość  $p$ , tym jaskrawsze kolory. Wyniki fMRI są więc wynikami tysięcy analiz statystycznych, ukazujących obszary tkanki, dla których można odrzucić hipotezę zerową o braku wpływu wykonywanego podczas badania zadania na zmiany parametru BOLD.

### PROBLEM PORÓWNAŃ WIELOKROTNYCH

Funkcjonalny rezonans magnetyczny, jak każda metoda statystyczna, daje wyniki pośrednie. Analiza statystyczna sygnału BOLD jest wynikiem badania, jednak nie jest bezpośrednią obserwacją aktywności neuronalnej, o którą ostatecznie chodzi w eksperymencie. Wyniki tej analizy przez niektórych nazywane są „fabrykacją”.

C.M. Bennett i współpracownicy (2011) przeprowadzili badanie mające wskazać na możliwość błędnej interpretacji danych statystycznych. Martwemu łososiowi zlecieli zadanie angażujące procesy poznawcze, a aktywność jego mózgu monitorowali za pomocą fMRI. Łososiowi przedstawiono serię piętnastu zdjęć, przedstawiających człowiekowate z gatunku *homo sapiens* w sytuacjach społecznych, indukujących ekspresję emocjonalną. Zadanie polegało na określeniu, jakich emocji doświadczają ludzie na zdjęciach. Bódcze prezentowano przez dziesięć sekund, a przerwa pomiędzy kolejnymi zdjęciami wynosiła dwanaście sekund. Badanie trwało pięć i pół minuty.

W wyniku skanowania fMRI wykryto piksele, które wykazywały statystycznie istotną różnicę aktywności w porównaniu z innymi obszarami mózgu martwego łososia. Piksele te skupiały się na obszarze  $81 \text{ mm}^3$ . Analiza statystyczna wykazała, że dane były istotne statystycznie ( $p < 0,001$ ).

Powyższe badanie, choć absurdalne, miało za zadanie ukazać problem błędu porównań wielokrotnych. Jest to zjawisko typowe dla metod statystycznych (Farah, 2014). Zakłada się, że aktywny statystycznie mózg martwego łososia to efekt zmienności losowej, związanej z przeprowadzaniem wielu testów statystycznych. Omówię mechanizm tego zjawiska, sposoby korekcji i związane z nimi kontrowersje z perspektywy funkcjonalnego rezonansu magnetycznego.

Analiza statystyczna pojedynczego badania fMRI zakłada przeprowadzenie testów statystycznych na około pięćdziesięciu tysiącach pikseli. Piksele to wydzielone obszary mózgu, o wymiarach około  $3 \times 3 \times 3$  milimetra, dla których mierzy się sygnał BOLD (Savoy, 2001). Każdy z pikseli jest przedmiotem testu porównującego wartość parametru BOLD piksela w ramach różnych warunków eksperymentalnych. Wyniki testu porównuje się z arbitralnie wyznaczonym poziomem istotności statystycznej (zazwyczaj 0,05),

jeśli wynik testu dla piksela jest mniejszy niż próg istotności statystycznej, przyjmuje się, że różnice prawdopodobnie nie są efektem przypadku, ale wynikają z warunków eksperymentalnych. Natomiast jeśli są wyższe, to prawdopodobne jest, że zmienność parametru BOLD nie ma związku z zadaniem eksperymentalnym. Próg istotności jest więc sztucznym warunkiem, który prawdopodobnie pozwala odróżnić różnice realne od nierealnych (Farah, 2014).

Przy progu istotności 0,05 mamy więc do czynienia z prawdopodobieństwem, że jedna na dwadzieścia zaobserwowanych różnic jest wynikiem zmienności losowej. Przy progu istotności 0,001, jedna na tysiąc obserwacji prawdopodobnie jest wynikiem przypadku. Im niższy próg istotności, tym bardziej prawdopodobne, że zmiany są specyficzne dla wykonywanego zadania.

Jeśli testujemy pięćdziesiąt tysięcy pikseli oddzielnie, to z powyższego wynika, że już na początku zakładamy prawdopodobne zaobserwowanie dwóch i pół tysiąca istotnych statystycznie pikseli, które tak naprawdę nie są istotne statystycznie (tzw. błąd pierwszego rodzaju). Przy progu 0,001 jest to odpowiednio pięćdziesiąt takich pikseli. Rozwiązaniem problemu byłoby ustalenie progu istotności tak niskiego, by prawdopodobieństwo różnic losowych ograniczyć do jednej na milion, jednak czułość fMRI nie poradziłaby sobie z takimi wymaganiami i prawdopodobnie nie obserwowalibyśmy wówczas żadnych różnic.

Istnieją statystyczne metody rozwiązania tego problemu. Jedną z nich jest stawianie hipotez *a priori*. W przypadku fMRI polega ona na wyznaczeniu interesujących badaczy obszarów mózgu przed eksperymentem, tak by zmniejszyć liczbę badanych pikseli i tym samym prawdopodobieństwo błędu porównań wielokrotnych. Rzecz jasna takie działanie nie pozwala obserwować zmian w całej tkance mózgowej, a tym samym może prowadzić do fabrykacji wyników – nawet jeżeli nieświadomej, to i tak niebezpiecznej, bo mylącej (Benjamini, 2010).

Badanie mózgu z założeniem, że teoria modularna mózgu jest prawdziwa, budzi kontrowersje. Przy wyznaczaniu *a priori* obszarów, w których spodziewana jest aktywność, wyniki zawsze będą wskazywać na istnienie specyficznego obszaru (modułu) biorącego udział w wykonywanym zadaniu, a tym samym potwierdzać hipotezę modularną. Rezygnacja z obserwacji mózgu jako całości może stać się przyczyną błędnych interpretacji wyników fMRI. Jest to podejście implikowane przez metodę, a co za tym idzie, może dostarczać tendencyjnych wyników (Hardcastle, Stewart, 2002).

Istnieją także testy statystyczne, pozwalające zwiększyć prawdopodobieństwo realności wyników. Zasada poprawki Bonferroniego czy techniki samowsporne (*bootstrap*) pozwalają ograniczyć błąd poprzez podnoszenie kryteriów uznawania danego piksela za istotny statystycznie, jednak są one związane z możliwością popełnienia innego rodzaju błędu (zostanie temu poświęcona następną sekcją niniejszej pracy). Najpewniejszą metodą przeciwdziałaniu problemowi błędów prób wielokrotnych wciąż

pozostaje ograniczenie liczby wykonywanych porównań do minimum (Benjamini, 2010), co implikuje stosowanie hipotez *a priori* w badaniach.

### ZAWYŻONE KORELACJE

Wiedza o konieczności korekty wyników ze względu na błąd próby wielokrotnej nie chroni ich przed kolejnymi nadinterpretacjami. Problem porównań wielokrotnych ma implikacje dla wyznaczania siły różnic pomiędzy pikselami. W 2005 r. jeden z badaczy doszedł do wniosku, że za pomocą parametru BOLD można wyjaśnić znaczną część wariacji szybkości chodzenia – korelacja była zdumiewająco wysoka (Vul, Pashler, 2012). Skłoniło to E. Vula do przyjrzenia się temu zagadnieniu. Pierwszy artykuł na ten temat opublikował pod znamionym tytułem: *Voodoo correlations in social neuroscience*. Wysokie korelacje pomiędzy wynikami fMRI a zachowaniem, jak się okazało, były często raportowane w literaturze.

Problem polega na tym, że próg istotności statystycznej, który służy do odsiewania pikseli, branych pod uwagę w analizie, implikuje istnienie korelacji. Korelacja mierzona dla każdego piksela składa się z sygnału i szumu. Czasem szum obniża wartość korelacji, czasem ją podwyższa. Piksele, które przebiły się przez próg istotności statystycznej, zawierają więc w sobie nadreprezentację pikseli, w których szum podwyższył korelację. Dlatego korelacja wyliczana na podstawie pikseli istotnych statystycznie będzie podwyższała realną korelację o wartość szumu. Ponieważ wartości szumu nie można wyznaczyć bez znajomości realnej korelacji, zależności pomiędzy aktywnością pikseli a zachowaniem nie da się zinterpretować (Vul, Pashler, 2012).

Korekta dla błędu próby wielokrotnej nie przeciwdziała przecenianiu wartości korelacji. Wręcz przeciwnie – jeszcze je wzmacnia. Korekta ta bowiem polega na uszczelnieniu kryterium przesiewowego (prugu istotności statystycznej), co ma przeciwdziałać uznaniu istnienia sygnału tam, gdzie go nie ma. Innymi słowy, zabieg ten odcina piksele o słabym sygnale, pozostawiając te o silnym sygnale na miejscach.

Korekta takiego błędu polega na statystycznej metodzie walidacji krzyżowej. Należy podzielić próbę statystyczną na dwa podzbiory. Za pomocą pierwszego wyznacza się piksele z sygnałem istotnym statystycznie, za pomocą drugiego wyznacza się korelację dla pikseli wyizolowanych z pierwszej próby. Pozwala to ominąć problem nadmiernej kumulacji szumu, który zawyża korelację. Ponad połowa opublikowanych badań nie brała tego błędu pod uwagę (Vul, Pashler, 2012), przedstawiając zawyżone korelacje. Prezentowanie szokujących wyników, które są niczym więcej jak tylko artefaktami, może stać za niezwykłą popularnością metody (Hardcastle, Stewart, 2002).

Przeprowadzenie analizy walidacji krzyżowej pozwala na obniżenie zawyżonej korelacji. Nie likwiduje jednak problemu niemożności interpretacji surowego sygnału

BOLD. Nie wyklucza także możliwości, że ze względu na słaby i zmienny w czasie sygnał BOLD, nawet wyznaczone w ten sposób piksele istotne statystycznie, odpowiadają realnym zmianom BOLD.

### PARAMETR BOLD

Założenie o korelacji pomiędzy zmianami poziomu tlenu we krwi a aktywnością neuronalną jest jednym z podstawowych założeń fMRI. Przekazuje ono pośrednie informacje o aktywacji neuronalnej o tyle, o ile założenie o ich korelacji jest prawdziwe. Dlatego wyniki rezonansu magnetycznego bezpośrednio charakteryzują raczej krążenie niż aktywność neuronalną (Aguirre, 1998).

Skanowanie metodą fMRI ma ograniczenia natury fizycznej. Na przykład rozdzielczość przestrzenna urządzenia to około 0,1 milimetra, a pojedynczy skan pozwala uchwycić około pięciu sekund zmian parametru BOLD. Brak precyzji nie pozwala na obserwację pojedynczej komórki i jej połączeń z większymi obszarami aktywności. W tym kontekście założenie odpowiedniości zmian hemodynamicznych (związanych z udziałem hemoglobiny w procesie metabolicznym komórek nerwowych) i procesu psychicznego staje się kontrowersyjne. Można zaobserwować zmiany parametru BOLD w relatywnie dużych obszarach tkanki mózgowej (wartości rzędu milimetrów), a także w relatywnie dużym czasie (wartości rzędu sekund), co sprawia, że uzyskane dane prawdopodobnie nie odpowiadają ani przestrzennemu przebiegowi procesu psychicznego związanego z zadaniem, ani jego wymiarowi temporalnemu. Można założyć istnienie procesów znacznie szybszych, a także obejmujących znacznie mniejsze obszary (Hardcastle, Stewart, 2002).

Psycholog W. Uttal (2001) ujął ten zarzut w następujący sposób: „fMRI jest odległe od procesu psychicznego, tak samo, jak skórna reakcja galwaniczna albo puls”. Założenie o korelacji pomiędzy procesem hemodynamicznym a procesem psychicznym pozwoliło zastosować nieinwazyjne metody badania układu nerwowego, jednocześnie budząc kontrowersje co do przedmiotu takiego badania. Aktualna wiedza na temat zależności pomiędzy przepływem krwi a aktywnością neuronalną nie pozwala stwierdzić, w jaki sposób wyniki fMRI korespondują z działaniem tkanki nerwowej (Logothetis, 2008), co jest wystarczającym powodem, żeby wnioski wyciągane z badań neuroobrazowych traktować ostrożnie.

Problem ten rozważany bywa także w kontekście wielozadaniowości pojedynczej komórki. Jeśli komórka może wykonać kilka zadań jednocześnie, co niekoniecznie musi być związane ze zwiększonym metabolizmem, wówczas parametr BOLD może stać się przyczyną błędu interpretacyjnego danych, polegającego na lokalizowaniu

ośrodków aktywności, kiedy mowa powinna być o symultanicznym działaniu całego układu nerwowego (Bickle, Hardcastle, 2012).

Jednym ze wskaźników, o których sądzi się, że pełni znaczną rolę w procesie aktywności neuronalnej, jest zmiana ilości protein w błonie komórki nerwowej, która prowadzić może do fundamentalnej zmiany działania komórki i typu przetwarzanej przez nią informacji (Aguirre, 1998). fMRI nie jest w stanie wziąć pod uwagę tych zmian. Ze względu na prawdopodobną nieadekwatność sygnału BOLD twierdzi się także (Klein, 2010a), że same neuroobrazy nie mogą być interpretowane jako obrazy realnych zmian aktywności układu nerwowego i nie stanowią dowodu takiej aktywności. Dlatego wyniki fMRI nie tylko nie są jednoznaczne, lecz sama ich interpretacja rodzi wiele kwestii spornych.

### PROBLEM INTERPRETACJI DANYCH

V.G. Hardcastle i M. Stewart w swoim artykule (2002) opisują wyniki badań neuroobrazowania. Dokonują krótkiej analizy 36 artykułów informujących o aktywności pola Brodmana „6”. Okazuje się, że ma ono związki z dowolnymi ruchami rąk i ramion, słyszeniem muzyki, pojemnością pamięci roboczej, rozpoznawaniem ekspresji emocjonalnej, rozbieżnością dwuoczną, procesem uczenia się, dystonią torsiwną, odczuwaniem bólu, swędzeniem oraz wydzieleniem kategorii i umiejętnością nazywania przedmiotów. To jednak nie wszystko, gdyż wiele badań, u których podstaw leży hipoteza *a priori* (przyczyny takiego postępowania opisano powyżej) o poszukiwaniu aktywności tylko w określonym obszarze, nie wskazuje na aktywność w obszarze „6”, nawet jeśli ona występuje.

Jaka więc jest funkcja obszaru „6”? W kontekście wyników badań nie jest wcale jasne, w jakim celu i jak struktura ta funkcjonuje w obrębie tkanki mózgowej. Neuronaukowcy zakładają jednak, że dalsze badania pozwolą odkryć jedną unifikującą funkcję obszaru „6”. W tym kontekście wydaje się, że badania neuroobrazowania są słuszną drogą do analizowania funkcji mózgu, jednak muszą zostać „dopracowane”, by możliwe było odnalezienie małych obszarów mózgu odpowiedzialnych za podstawowe zadania poznawcze.

Z drugiej strony powyższa krótka metaanaliza może być również dowodem, że kolejne badania ukazą obszar „6” jako uczestniczący w każdym zadaniu poznawczym. Jeśli natomiast funkcja danego obszaru zależy od kontekstu, w jakim funkcjonuje, i działania całej tkanki nerwowej, wówczas poszukiwanie małych obszarów funkcjonalnych jest pomyłką (Hardcastle, Stewart, 2002).

Problemy interpretacyjne rodzi także tendencyjne przedstawianie wyników fMRI jako kolorowych map statystycznych, sugerujących istnienie modułów odpowiedzial-

nych za poszczególne zadania poznawcze. Dobór kolorów może służyć wyraźnemu ukazaniu różnic, które w rzeczywistości nie są tak wyraźne, jak mogłaby to sugerować kolorystyka. C. Klein (2010a, s. 269) pisze: „Neuroobrazy nie są mapami różnic aktywności. Pokazują one miejsca, w których (*ceteris paribus*) dane wspierają twierdzenie o wzorcu zróżnicowanej aktywności”. Nie tyle więc można mówić na podstawie wyników fMRI, że jeden obszar jest bardziej aktywny od drugiego, ile można przypuszczać, że obszar pikseli istotnych statystycznie podczas wykonywania zadania działał inaczej niż inne obszary w zakresie procesu metabolicznego. Taka interpretacja danych stawia pod znakiem zapytania prezentację wyników w formie kolorowych map większej i mniejszej aktywności.

Kolejne problemy z interpretacją wyników fMRI wynikają z metaanalizy danych uzyskanych w wyniku skanowania. Nawet jeśli rozwiązane zostaną powyższe wątpliwości, wyniki fMRI wciąż nie będą jednoznaczne.

Rozważmy cytowany przez C. Kleina przypadek (za Friston, 1996). Wyniki fMRI ukazują, że obszar R kory mózgowej był bardziej aktywny, kiedy badany miał za zadanie rozpoznać obiekty, niż kiedy jego zadaniem było rozpoznanie kształtu. Jeśli zadaniem badanego było najpierw rozpoznać obiekt, a potem go nazwać, obszar R nie wykazywał już różnic w aktywności. Można to zinterpretować następująco: obszar R jest istotny dla rozpoznawania obiektów, ale nie dla ich nazywania. Analiza statystyczna ukazuje jednak istotną korelację pomiędzy tymi zadaniami. Stopień aktywacji R spowodowany rozpoznaniem obiektu był większy, gdy częścią zadania było rozpoznanie obiektu, a nie tylko jego nazwanie.

Takie wyniki naruszają podstawową zasadę teorii funkcjonalnych, które twierdzą, że poziom aktywności danego ośrodka odpowiedzialnego za daną funkcję pozostaje niezmienny i niezależny od innych wykonywanych zadań (Klein, 2010b). W istocie nie wiadomo jednak, w jaki sposób jakakolwiek zmiana w aktywacji tkanki wpływa na poziom aktywacji innej części tkanki, dlatego obserwowane różnice statystyczne nie muszą być związane z wykonywanym przez badanego zadaniem, ale mogą wynikać ze zmian aktywności całego układu nerwowego.

Drugą ważną kwestią dyskutowaną w odniesieniu do tego tematu jest znaczenie danych ilościowych. Wskazują one wprawdzie, że jest różnica co do aktywności pomiędzy obszarami, jednak nie informują o nasileniu tych różnic. Wskaźnik  $p$ , który jest podstawowym parametrem fMRI, może być interpretowany tylko w kategorii prawdopodobieństwa, w związku z tym wyznaczanie siły różnic jest tak naprawdę wyznaczaniem „siły” prawdopodobieństwa. Im większe prawdopodobieństwo, tym większa „siła” różnic.

Kiedy mówimy o zależności aktywacji danego obszaru mózgu od wykonywanego zadania w takich kategoriach, nie jest jasne, co dokładnie znaczy „zależność”.

Niektórzy twierdzą, że neuroobrazy ukazują korelaty neuronalne procesów poznawczych. Implikuje to tezę o istnieniu małych obszarów aktywacji neuronalnej w tkance nerwowej, odpowiedzialnych za konkretne zadania. Jest to zarazem najprostszy sposób odczytania informacji zawartych w mapach statystycznych będących produktem fMRI, jak i sposób sugerowany przez prezentację wyników. Powszechnie twierdzi się (Klein, 2010b), że jest to dowód na to, że dany obszar bierze udział w wykonywaniu jakiegoś zadania (Enger, 2009). Jednak wyniki można interpretować także jako sygnał, że dany obszar bierze udział w przetwarzaniu specyficznego typu informacji (Koechlin, Summerfield, 2007). Niektórzy uważają, że aktywacja dotyczy regionów reprezentujących informacje istotne dla danego zadania (Wood, Grafman, 2003). Te trzy teorie nie wykluczają się wzajemnie i wskazują na złożoność procesu interpretacji wyników badań neuroobrazowych.

#### PODSUMOWANIE

Metoda badań neuroobrazowych jest niedoskonała. Nie oznacza to jednak, że nie należy jej stosować. Kontrowersje tak naprawdę dotyczą nadużyć interpretacyjnych. Błędy statystyczne zawyżające wyniki badań, utożsamienie procesu metabolicznego z procesem psychicznym, brak spójności otrzymywanych danych, tendencyjne prezentowanie wyników i wreszcie wyniki, które przeczą podstawowym założeniom metody. Wszystko to wymaga namysłu i poważnych rozstrzygnięć, zbyt często bowiem powierzchowne traktowanie takich problemów prowadzi do swoistego „kultu ikon”, jak nazwał wyniki fMRI S. Poole (2012), brytyjski pisarz popularnonaukowy.

Wydaje się, że stworzenie wiarygodnej metody badania procesu aktywności neuronalnej wymaga szerokiej wiedzy o działaniu pojedynczej komórki nerwowej. Złożoność tkanki nerwowej i procesów w niej zachodzących może „wodzić nas za nos”. Próby wyjaśniania tak złożonej struktury jak mózg przy użyciu jednego tylko parametru (BOLD) są z góry skazane na porażkę. „Robimy to, co możemy, kiedy nie możemy robić tego, co powinniśmy” – pisał W.R. Uttal (2001, s. 208). Uczciwa interpretacja wyników jest tym, co można zrobić. Dlatego krytyka neuroobrazowania jest ważna, a znajomość problemów, które porusza, pomaga zorientować się, co naprawdę ukazują mapy mózgu.

Filozof J. Fodor (1999, s. 68-69) w eseju *Why the brain?* pisze: „Jeśli umysł wydarza się w przestrzeni, wydarza się gdzieś na północ od szyi. Co daje nam wiedza jak daleko na północ?”. Wciąż pozostaje kwestią dyskusyjną, czy neuroobrazowanie wskazuje na coś więcej niż frenologia – jest to kwestia interpretacji. Krytyk neuroobrazowania, W.R. Uttal (2001), twierdził, że jest to po prostu nowa frenologia.

## LITERATURA

- Aguirre, G.K. (1998). The variability of human, BOLD hemodynamic responses. *Neuroimage*, 8.4, 360-369.
- Benjamini, Y. (2010). Simultaneous and selective inference: Current successes and future challenges. *Biometrical Journal*, 708-721.
- Bennett, C.M., Baird, A.A., Miller, M.B., Wolford, G.L. (2011). Neural correlates of interspecies perspective taking in the post-mortem atlantic salmon: an argument for proper multiple comparisons correction. *Journal of Serendipitous and Unexpected Results*, 1, 1-5.
- Bickle, J., Hardcastle, V. (2012). *The Philosophy of neuroscience*. John Wiley & Sons.
- Buxton, R.B. (2002). *Introduction to Functional Magnetic Resonance Imaging: Principles and Techniques*. New York: Cambridge University Press.
- Enger, T. (2009). Prefrontal Cortex and Cognitive Control: Motivating Functional Hierarchies. *Nature Neuroscience*, 12, 7, 821-822.
- Farah, M.J. (2014). *Brain Images, Babies and Bathwater: Critiquing Critiques of Functional Neuroimaging*. Hasting center reports.
- Fodor, J. (1999). Why the brain? *London Review of Books*, 21, 68-69.
- Friston, K.J. (1996). The Trouble With Cognitive Subtraction. *Neuroimage*, 4, 2, 97-104.
- Hardcastle, V.G., Stewart, M. (2002). What do brain data really show? *Philosophy of Science*, 72-82.
- Klein, C. (2010a). Images are not the evidence in neuroimaging. *Br J Philos Sci*, 61(2), 265-278.
- Klein, C. (2010b). Philosophical Issues in Neuroimaging. *Philosophy Compass*, 5/2, 186-198.
- Koechlin, E., Summerfield, C. (2007). An Information Theoretical Approach to Prefrontal Executive Function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 6, 229-235.
- Logothetis, N.K. (2008). What we can do and what we cannot do with fMRI? *Nature*, 869-878.
- Nair, D.G. (2005). About being BOLD. *Brain Research Reviews*, 229-243.
- Poole, S. (2012). Your Brain on Pseudoscience: The Rise of Popular Neurobollocks. *New Statesman* (6 października), akapit 18.
- Savoy, R.L. (2001). History and future directions of human brain mapping and functional neuroimaging. *Acta Psychologica*, 9-42.
- Uttal, W.R. (2001). *The New Phrenology: The Limits of Localizing Cognitive Processes in the Brain*. Cambridge: MA: MIT Press.
- Vul, E., Pashler, H. (2012). Voodoo and circularity errors. *Neuroimage*, 62, 2, 945-948.
- Wood, J.N., Grafman, J. (2003). **Human Prefrontal Cortex: Processing and Representational Perspectives**. *Reviews Neuroscience*, 4, 2, 139-147.

**NEUROOBRAZOWANIE. PRZEGLĄD KRYTYKI FMRI**

**STRESZCZENIE:** Metody neuroobrazowania są niedoskonałe, jednak nie oznacza to, że nie powinno się ich używać. Istnieje wiele kontrowersji wokół interpretacji danych fMRI oraz neuroobrazowania. Krytyka neuroobrazowania ukazuje szereg problemów metody: możliwe błędy statystyczne (np. błąd porównań wielokrotnych), zawyżanie wartości wyników badań, brak wiedzy o zależności pomiędzy parametrem BOLD a aktywnością neuronalną czy stawianie tendencyjnych, implikowanych metodą hipotez. Krytyka neuroobrazowania oferuje klucz do zrozumienia, co tak na prawdę pokazują nam neuroobrazy.

**SŁOWA KLUCZOWE:** fMRI, neuroobrazowanie, błąd porównań wielokrotnych, parametr BOLD.

**NEUROIMAGING. REVIEW OF CRITIQUE OF FMRI**

**SUMMARY:** The methods of neuroimaging are imperfect, but still can be useful. There are many controversies about fMRI data analysis and meaning of neuroimages themselves. The critique of neuroimaging spotlights various problems: possible statistical misinterpretations (like multiple comparisons), overestimate outcome of research, lack of knowledge about correlation between BOLD parameter and neural activity or biased hypothesis implicated by method. The critique of neuroimaging offers us a key to understand what do neuroimages really show.

**KEYWORDS:** fMRI, neuroimaging, multiple comparisons, BOLD parameter.